

GLACIARES DE LA ANTARTIDA

Antarctic Glaciers

Francisco Anguita (*)

RESUMEN

Los glaciares antárticos contienen el 90% del hielo que existe en la Tierra, y por ello son a la vez uno de los factores básicos de control del clima, y testigos de la glaciación que nuestro planeta atraviesa desde hace unos 40 millones de años. Aunque la gran masa de hielo forma un casquete glaciar, todos los subtipos de glaciares existen en la Antártida. Hay indicios múltiples de que este gran laboratorio del clima terrestre está entrando en una fase acelerada de inestabilidad.

ABSTRACT

Antarctic glaciers make 90% of the Earth ice. They represent therefore a basic climatic control element, and also the only complete record of the glaciación the Earth is experiencing during the last 40 Ma. Though the mass of ice is the model ice sheet, all glacier subtypes are found in Antarctica. Scientists are amassing a considerable amount of data pointing out that antarctic ice is now entering a phase of growing instability.

Palabras clave: Glaciares, Geomorfología, Climatología.

Keywords: Glaciers, Geomorphology, Climatology.

INTRODUCCIÓN

Una mirada a un mapa de la Antártida (Fig. 1) es suficiente para comprender por qué la geología de este continente es la peor conocida de todo el planeta: el 98% de su superficie está cubierto por un casquete glaciar de 3 km de espesor medio, del que sólo destacan los nunataks (Fig. 2), cumbres aisladas pertenecientes en su mayoría a las Montañas Transantárticas, una cadena paleozoica que separa las partes oriental y occidental del continente. Esta cubierta helada hace que la línea de costa antártica sea un rasgo más aparente que real, ya que buena parte del continente está por debajo del nivel del mar, hundido por el peso de los glaciares. La Antártida tendría un aspecto muy distinto si éstos desapareciesen, aunque la isostasia haría que la corteza subiese lentamente, recuperando en parte el continente su contorno actual.

En teoría, el casquete glaciar antártico sería el mejor ejemplo de glaciar frío, es decir sin agua de fusión en su base; sin embargo, la presencia (probablemente local y esporádica) de un nivel líquido está demostrada por la abundancia de lagos subglaciales (Fig. 3), y también por la elevada, aunque ocasional, velocidad de algunas de sus corrientes de hielo, difícil de explicar sin un nivel de despegue basal. Sin embargo, no hay acuerdo sobre la existencia en glaciares antárticos de oleadas glaciares, como en los alpinos. La abundancia de sedimentos en algunas zonas también encaja mejor en las características de los glaciares templados.

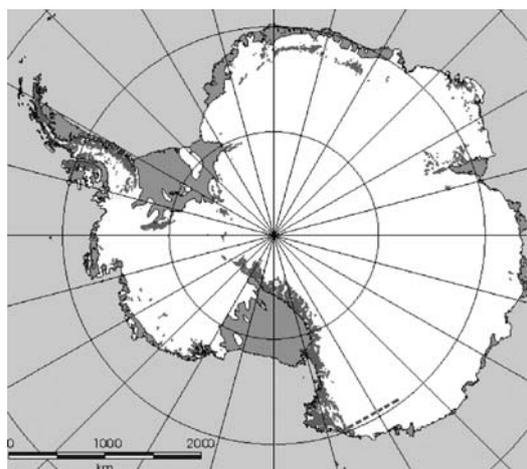


Fig. 1. Afloramientos en la Antártida. El 2% de rocas no cubiertas por el hielo se concentran sobre todo en las Montañas Transantárticas. Tomada del Atlas of Antarctic Research, U.S. Geological Survey, Department of the Interior.

La existencia de tal masa de hielo es hasta cierto punto paradójica, porque, como consecuencia de la baja temperatura y la alta densidad del aire, el centro del continente está ocupado de forma casi permanente por un profundo anticiclón. Esto significa que las precipitaciones son muy escasas, y por lo tanto

* Departamento de Petrología. Facultad de Ciencias Geológicas. Universidad Complutense, 28040 Madrid. E-mail: anguita@geo.ucm.es

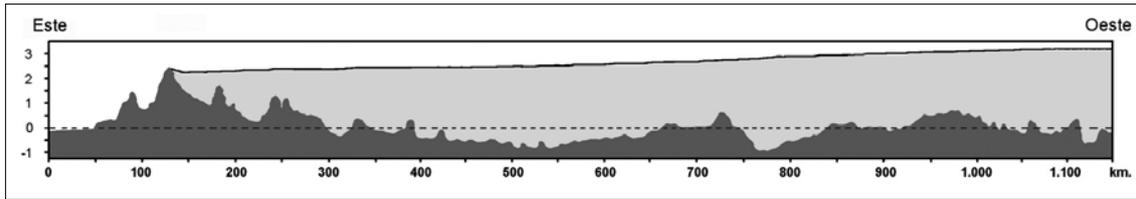


Fig. 2. a) Perfil topográfico a través de la Antártida Oriental. En Studinger et al. (2004). b) Nunatak.

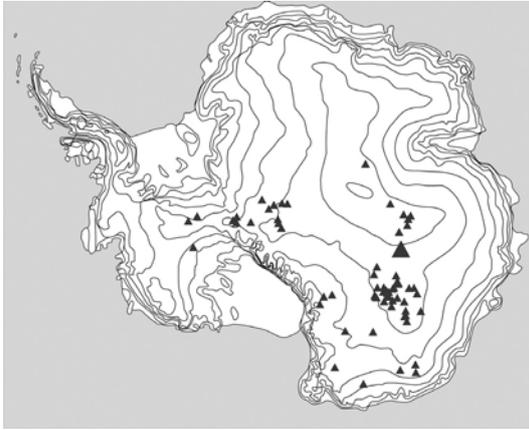


Fig. 3. Lagos bajo el hielo antártico. El triángulo mayor señala la situación del Lago Vostok. En Siegert et al. (2001).

que el hielo se acumuló bajo un clima distinto al presente. En la actualidad, las bajas temperaturas implican una tasa de sublimación cercana a cero, por lo que las escasas precipitaciones se conservan al 100%. En estas condiciones, es el viento el principal agente de modelado del hielo (Fig. 4).



Fig. 4. Sastrugis. Cadena Patuxent, Montañas Transantárticas.

Este hielo fósil fluye bajo su propio peso, en general de forma plástica (Fig. 5), aunque en superficie las formas dominantes son las grietas abiertas (crevasse, Fig. 6). Se ha subrayado el parecido entre el comportamiento de este material y el de las rocas metamórficas, que también se generan y deforman en las cercanías de su punto de fusión. Por ejemplo, el hielo adquiere al fluir una foliación semejante a la de las rocas metamórficas.

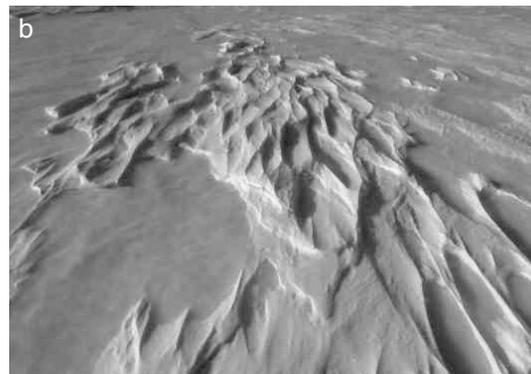
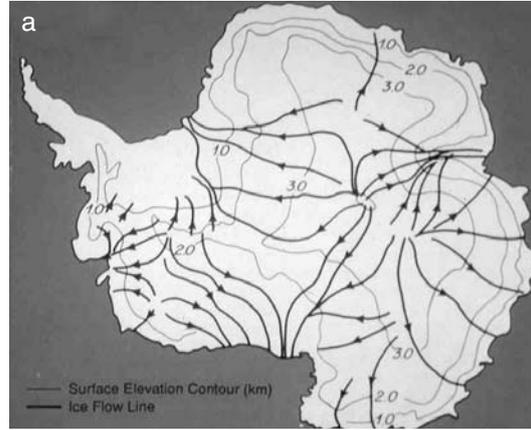


Fig. 5. a) El flujo del hielo en la Antártida Oriental forma una bóveda desde la cual el casquete se desliza hacia el mar. En Bamber, http://www.jpl.nasa.gov/images/antarcticalicesheet_map1_caption.html. b) Lentes de deformación (horses, o sea elementos tectónicos delimitados por fallas) en los Montes Thiel, Montañas Transantárticas. c) Lengua glaciaria plegada y fracturada en pliegues isoclinales asociados a cabalgamientos, Fumarole Bay, Isla Decepción, Archipiélago de las Shetland del Sur.



Fig. 6. Crevasses. Patuxent Range, Montañas Transantárticas.

El flujo del hielo hacia las costas se produce a velocidades muy desiguales, a causa sobre todo de las diferencias de pendiente: las zonas más activas se llaman corrientes de hielo (Fig. 7). A veces, estos flujos surgen de zonas de cumbres (glaciares de circo); después pueden encajarse (glaciares de valle, Fig. 8). En las costas antárticas, recientemente liberadas del hielo, encontramos morfologías típicas de flujo glaciar, como rocas aborregadas (Fig. 9). El balance entre acumulación y ablación es complejo: algunos glaciares están creciendo, mientras que otros, la mayoría, menguan (Tabla I). Los glaciólogos aceptan hoy que los casquetes glaciares son sistemas inestables, que experimentan variaciones muy rápidas, una conclusión de importancia para evaluar la evolución climática futura.

Una particularidad del casquete antártico con un gran potencial científico es la presencia de lagos en el fondo. Se originan por fusión del hielo, favoreci-



Fig. 7. Ejemplos de distintos tipos de glaciares antárticos. a) La corriente de hielo Foundation, en la Antártida Occidental, con características bandas de flujo. b) Detalle de la misma corriente de hielo, con grandes bloques abandonados en una morrena lateral. Este glaciar pierde 4 km³ de hielo al año. c) Un glaciar de circo en la Isla Brabante, Archipiélago de Palmer. d) Un glaciar de piedemonte. Isla Livingston, Archipiélago de las Shetland del Sur.



Fig. 8. El Canal Lemaire, en la Península Antártica. El antiguo modelado glaciar del canal queda de relieve en esta perspectiva orientada hacia el sur, con el clásico perfil en U. Fotografía de Mariano Álvarez.

Glaciar	Área (km ²)	Acumulación (km ³ /año)	Ablación (km ³ /año)	Balance neto (km ³ /año)
Thwaites	164.800	57,6	80,1 ± 8	-8
Kohler	10.200	2,7	9,9 ± 1	-7
Subtotal para el Mar de Amundsen	382.600	150	222 ± 9	-72 ± 12
Whillans	235.200	37,5	33,0 ± 1	+5
F	16.800	2,7	1,6 ± 0	+1
Subtotal para el Mar de Ross	720.900	111	78 ± 1	+33 ± 6
Foundation	221.600	28,0	31,7 ± 3	-4
Carlson	9.100	2,9	2,6 ± 0	0
Subtotal para el Mar de Weddell occidental	558.600	120	128 ± 5	-9 ± 8
Total para la Antártida Occidental	1.662.100	381	429 ± 10	-48 ± 14
Recovery	964.300	43,8	39,6 ± 3	+4
Bailey	66.700	7,6	7,9 ± 1	0
Subtotal para el Mar de Weddell oriental	1.530.200	84	79 ± 4	+5 ± 6
Byrd	1.070.400	44,7	23,6 ± 2	+21
Scott	29.500	9,4	9,2 ± 1	0
Subtotal para el Mar de Ross	1.185.400	53	30 ± 2	+23 ± 4
Total para la Antártida Oriental	5.521.700	433	411 ± 8	+22 ± 23

Tabla I. Balance de acumulación / ablación para algunos glaciares antárticos (en Rignot y Thomas, 2002)



Fig. 9. Roca aborregada. La Isla Couverville, frente a la Península Antártica, fue erosionada por el hielo. Cortesía de Carlos Díaz.



Fig. 11. Acantilado de hielo. Bahía Biscoe, Isla Amberes, Archipiélago de Palmer.

da por su propia presión y el calor geotérmico, acumulándose el agua (supuestamente prístina) en depresiones del terreno. A su vez, estas cubetas son producto de la capacidad del casquete helado de fluir a contrapendiente. Hay localizados unos setenta lagos; el mayor, con 300 km de anchura y 700 m de profundidad, es el Vostok (Fig. 10a), localizado sobre lo que parece un antiguo rift, y que se ha convertido en un punto neurálgico de varias investigaciones de gran calado. Por una parte se ha perforado un largo sondeo de investigación paleoclimática que ha encontrado una excelente correlación entre las variaciones de los gases de invernadero y las de la temperatura (Fig. 10b). Además, el estudio del agua del lago y de su hipotético contenido biológico tiene conexiones con temas tan críticos como el posible origen de la vida en Marte. La *conexión marciana* tiene como base el aislamiento del lago respecto a la atmósfera desde su origen, hace unos 15 millones de años. Si hay vida en Marte, tampoco podrá depender del hostil medio exterior; y el Vostok, sin luz, sin carbono y a -2°C , es un medio tan exigente como puede ser el subsuelo de Marte.

Todo el hielo del casquete acaba su vida en el

mar. Al llegar a la costa, las corrientes mejor alimentadas forman plataformas de hielo, cornisas heladas apoyadas sobre el mar. Las principales son las de Ronne y Filchner, sobre el Mar de Weddell, y la de Ross, sobre el mar de igual nombre, una en cada extremo de la vertiente occidental de las Montañas Transantárticas. En la costa, el hielo puede formar acantilados (Fig. 11) si su avance es lento, porque entonces el oleaje lo erosiona a medida que avanza: el mar se llena entonces de bloques de hielo (Fig. 12). Con alimentación importante, las corrientes de hielo dan lugar a icebergs (Fig. 13a), grandes bloques informes de los que sólo emerge entre el 20 y el 30% de la masa total, y que se desprenden al propagarse fracturas en su frente. En general éstas son debidas a la mayor velocidad de la capa superficial del hielo respecto a la base (Fig. 13b). Por su parte, de las plataformas de hielo (que generan entre 60 y 80% de todos los icebergs) se desprenden enormes bloques de hielo en forma de mesa (témpanos tabulares, Fig. 13c).

Una vez desprendidos, los témpanos son arrastrados por las corrientes y, en último término, por los vientos predominantes. Mientras que de algunas zonas apenas se desprenden témpanos, en la costa orien-

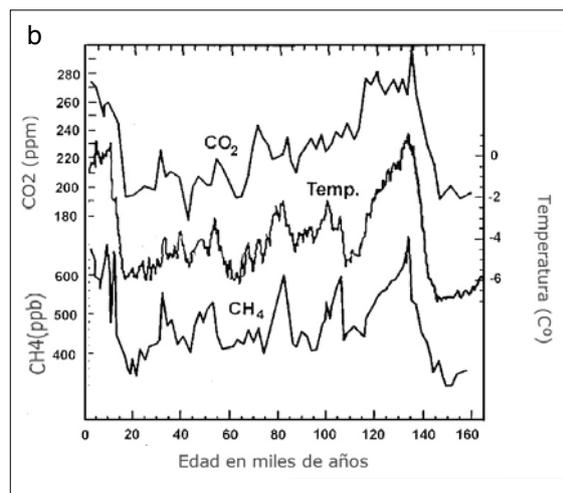
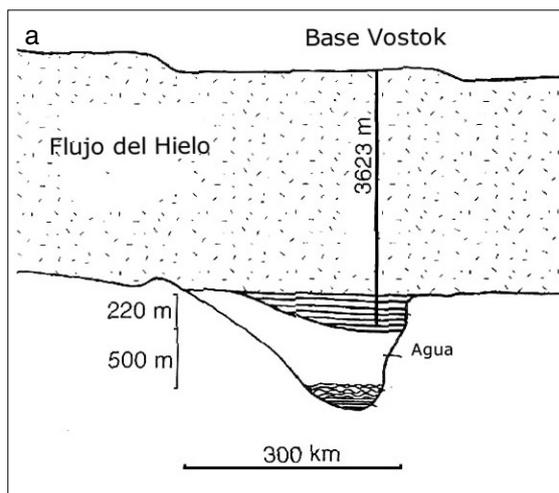


Fig. 10. a) Perfil esquemático del Lago Vostok. El rayado horizontal marca el hielo formado por congelación del agua del lago. b) Correlación entre las concentraciones de dióxido de carbono y metano, y las de la temperatura. En Martini et al. (2001).



Fig. 12. Pequeños bloques de hielo acompañando a un témpano tabular de unos 500 m de anchura, en el Mar de Ross. El témpano grande se mueve más deprisa, por lo que está dejando una estela limpia de bloques.

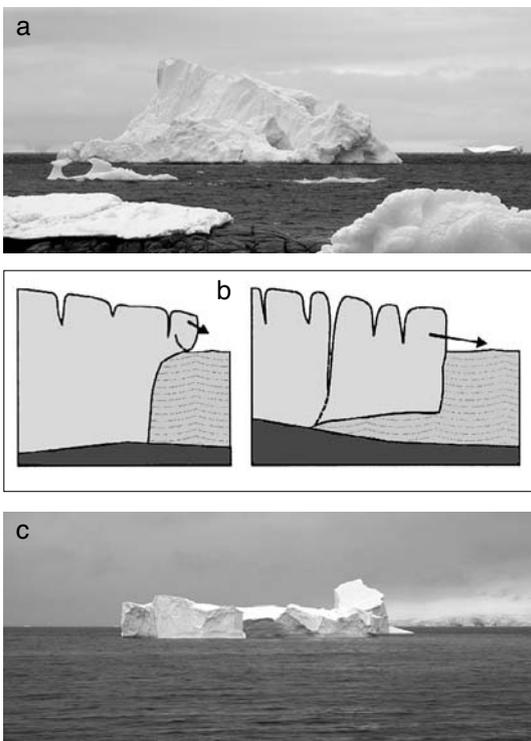


Fig. 13. a. Iceberg. Estrecho de Gerlache, Península Antártica. Foto de Luis Pérez de Heredia. b. Esquema de formación de icebergs (en Van der Veen, 2002). c) Témpano tabular. Foto de Pau Renard.

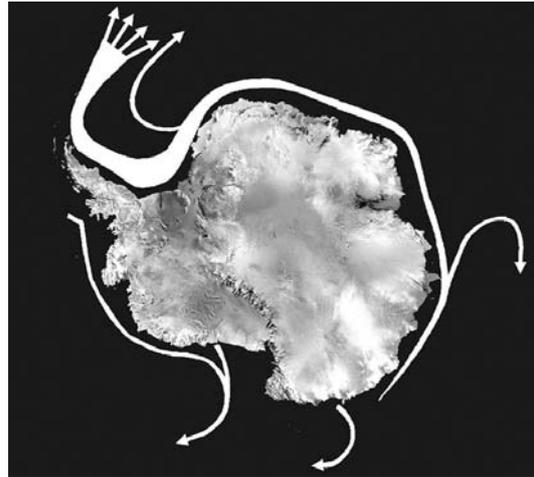


Fig. 14. Impulsados por los vientos del este, los témpanos se mueven a través del Mar de Weddell formando la denominada avenida de los icebergs. En 1914, el *Endurance*, barco del explorador británico Ernest Shackleton, fue transportado casi mil kilómetros atrapado en esta corriente de hielo. Modificado de Anderson (1999) por Pau Renard.

tal de la Península Antártica se forma una avenida de los icebergs, por la que se dirigen hacia el Atlántico Sur buena parte de los que surgen de la Antártida Oriental (Fig. 14). Las velocidades son muy variables: se han medido máximas de 2 m/s, pero 1 km/día es un registro más típico. Curiosamente, hasta su rumbo es impredecible, porque las distintas formas y calados de cada témpano provocan respuestas diferenciadas a vientos locales y corrientes de diferentes profundidades. Según su volumen y la temperatura del agua que le rodee, un iceberg puede durar hasta cinco años; pero los que viajan rápidamente hacia el norte sucumben en menos de un año a la erosión del oleaje y a la fusión por aguas más cálidas. Antes de perecer, los más grandes dejan su firma en los fondos oceánicos, por donde arrastran su quilla, que a veces supera los 300 metros de calado (Fig. 15).



Fig. 15. La firma de los icebergs en el fondo del mar de Weddell. En Anderson et al. (2001). *Earth Science Publications, Rice University*.

En el invierno austral, una importante extensión del mar que rodea al continente se congela, formándose, en latitudes superiores a 60° sur, la llamada banquisa (Fig. 16), formada por hielo marino, ligeramente salado, que alcanza los 160 km de anchura y un espesor típico de algo más de un metro, aunque puede llegar hasta cuatro. Esta enorme extensión blanca tiene una gran influencia en el clima, ya que condiciona el balance térmico de la atmósfera y la distribución de anticiclones y borrascas. Además, buena parte de las gestas de la época heroica de la exploración de la Antártida tienen relación con la nave-

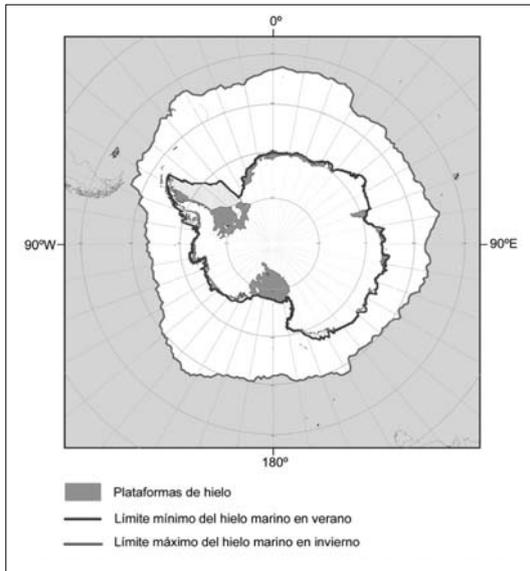


Fig. 16. Extensión máxima y mínima de la banquisa antártica. En invierno la superficie helada del mar casi llega a igualar la del continente. Mapa de la Australian Antarctic Division, © Commonwealth of Australia (2005).

gación a través de la banquisa, cuyas condiciones pueden cambiar bruscamente, dejando a un barco irremediamente atrapado. Una característica que distingue a la banquisa de los icebergs es que, por carecer casi por completo de quilla, el hielo marino deriva sólo muy lentamente a favor de las corrientes.

LA EVOLUCIÓN DEL CLIMA EN LA ANTÁRTIDA: DE BOSQUE OCEÁNICO A DESIERTO DE HIELO EN 50 MILLONES DE AÑOS

Los inexistentes turistas antárticos de hace 14.000 años no hubiesen visto ni una sola roca en su crucero: por aquel entonces, toda la Península Antártica estaba cubierta de hielo; más aún, probablemente los geólogos habrían tenido que *suponer* la existencia de las Montañas Transantárticas, ya que, según algunos glaciólogos, también la cadena estaba sumergida en el hielo. Sólo después ha comenzado éste a fundirse, y la corteza terrestre a asomar. Es el último episodio de una historia de algo más de 50 millones de años, y cuyo protagonista es la última gran glaciación.

Durante toda la Era Secundaria el continente antártico, situado en la actual posición del sur de Suramérica, disfrutó de un clima templado, con espesos bosques de coníferas y un sistema fluvial. Pero hace 55 Ma (ver la figura 3 del artículo “Las causas de las glaciaciones”) la geografía juega sus cartas. Una corriente marina que recorría el ecuador tiene que desviarse a medida que África migra hacia el norte y se aproxima a Europa. El resultado de esta colisión serán los Alpes, pero la corriente busca un camino nuevo, por el sur de la India y de África. Al recorrer latitudes altas, el agua se enfría y el clima del planeta también.

La historia de este enfriamiento ha quedado registrada: hace unos 40 Ma, los fondos de los mares antárticos empiezan a recibir fragmentos transportados por icebergs; y hace 34 Ma hay huellas de glaciares de casquete en la Antártida Oriental, primero en las Montañas Transantárticas y otras zonas aisladas, y un millón de años después, en todo el subcontinente (Fig. 17); en la Antártida Occidental la glaciación sólo comenzará a partir de los 30 Ma, y no culminará hasta hace 10 Ma. Durante las últimas décadas, los climatólogos han discutido sobre las causas de esta evolución, que ha alterado de forma radical el clima de todo el planeta, ya que lo que empezó como una glaciación antártica ha terminado por extenderse también al hemisferio norte. Dos son las hipótesis más defendidas: una que podríamos llamar “oceánica”, y otra que se podría calificar de “atmosférica”. Según la primera, fue la separación de la Antártida respecto a los últimos continentes vecinos, Australia y Suramérica, la causante del enfriamiento decisivo, al permitir el establecimiento de la Corriente Circunantártica, que aislaría térmicamente al continente del influjo de aguas cálidas. La escasa radiación solar debida a su posición sobre el polo haría el resto.

La segunda escuela pone el énfasis en posibles variaciones en el efecto invernadero. Entre 50 y 40 Ma, los volcanes submarinos, que hasta esa época

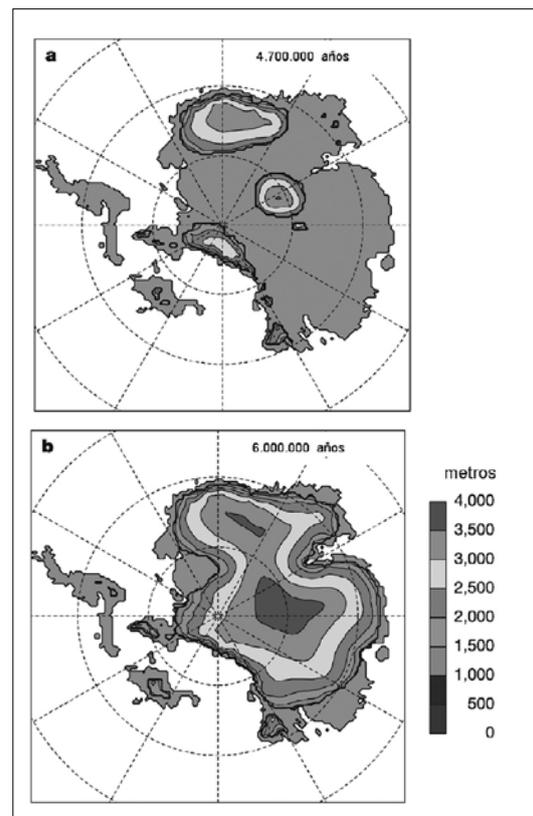


Fig. 17. El desarrollo del casquete glaciar en la Antártida Oriental en un modelo basado en el cambio en la concentración de CO₂. Entre las dos etapas sólo habrían transcurrido 1.300.000 años. En DeConto y Pollard (2003).

habían estado muy activos, se toman un respiro, y la concentración de CO_2 en la atmósfera se reduce drásticamente. Según este dato, la caída térmica que tiene lugar en esta época se habría debido al descenso en la concentración del más importante de los gases de invernadero de la atmósfera terrestre. Un segundo factor de enfriamiento podría ser el enterramiento de los ingentes sedimentos ricos en carbonatos (que incluyen CO_2) formados en la época cálida. Ambos factores podrían explicar el deterioro climático, pero no están reñidos con la hipótesis anterior. De hecho, ambas ideas no se excluyen, ya que, aunque no fuese el principal desencadenamiento de la glaciación, el aislamiento térmico del continente podría haber acelerado su llegada.

El principal problema de la hipótesis oceánica radica en el tiempo. Por una parte, no es tarea fácil definir con precisión el momento de separación efectiva entre la Antártida y Suramérica. ¿Cuándo se abrió el Paso de Drake a una circulación oceánica profunda? ¿Sucedió esto justo antes de la glaciación? Los datos actuales inclinan a pensar que la glaciación llevaba ya varios millones de años en marcha en la Antártida Oriental antes de que el Drake adquiriese su profundidad actual, hace probablemente unos 30 Ma. El segundo escollo es que, si la corriente circumpolar es el factor decisivo, una vez establecida ésta la glaciación debería de funcionar como un reloj. Sin embargo, los últimos datos hablan de grandes fluctuaciones en la capa de hielo, entre los 25 y los 15 Ma, un intervalo en el que algunos científicos proponen un retroceso de los glaciares antárticos, que incluso dejarían libres de hielo grandes extensiones del continente. Estos problemas no significan que el papel climático de las corrientes marinas se discuta. Un ejemplo de estas repercusiones es el cierre del istmo de Panamá, hace 3 Ma, que anuló el último resto de la corriente ecuato-

rial, contribuyendo al crecimiento de los glaciares en las dos partes de la Antártida, y al surgimiento del casquete de Eurasia-Norteamérica.

Así pues, los océanos, los grandes sistemas de transporte de calor en la Tierra, juegan un gran papel en el desarrollo de las glaciaciones. No el único, sin duda: de no ser porque los movimientos del interior terrestre llevaron a la Antártida a su actual latitud polar, quizá el continente habría seguido siendo la gran tierra boscosa que era hasta hace 50 millones de años. Ahora bien, una vez que la glaciación se ha establecido, ¿podemos conjeturar cuál será su evolución futura? Desde el último máximo glacial de hace 14.000 años, la temperatura media en el centro del continente ha subido 8°C . Lógicamente, también los océanos antárticos se están calentando, y esto tiene su efecto sobre las plataformas de hielo, de las que en los últimos años se han desprendido enormes icebergs tabulares. El tamaño de las plataformas destruidas es del orden del de Luxemburgo (Fig. 18). Para algunos glaciólogos, es el principio del fin de las plataformas de hielo de la Antártida Occidental, las más importantes; y, a la larga, de todo el hielo antártico, ya que cuando las plataformas desaparecen, las corrientes de hielo que las alimentan experimentan bruscas aceleraciones, lo que en último término vaciaría de hielo el continente. Se ha confirmado que el glaciar que alimenta la plataforma Larsen B, la última desaparecida, ha triplicado su velocidad.

Sin embargo, los datos de conjunto son confusos. Parece que el hielo de la Antártida Oriental está en equilibrio, mientras que en la plataforma de Ross hay un claro aumento, en las de Ronne y Filchner una ligera pérdida, y en la Tierra de Marie Byrd un descenso que roza lo catastrófico: esta zona está subiendo 12 mm al año debido al adelgazamiento de la capa de hielo que la cubre. En cuanto a las causas, los clima-

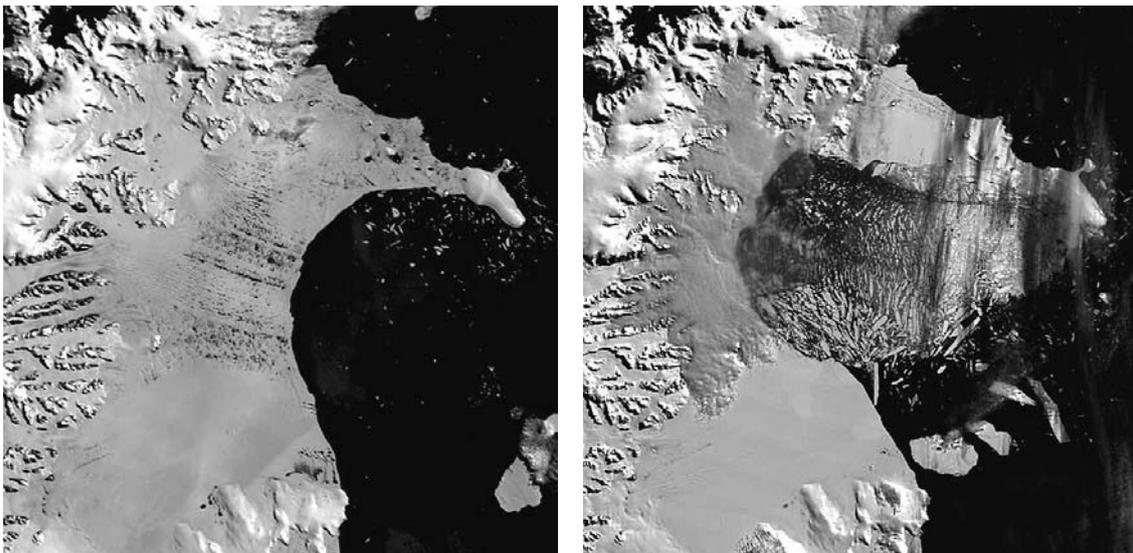


Fig. 18. La parte norte de la plataforma de hielo Larsen B, en la costa este de la Península Antártica, antes y después de su desintegración, un proceso que tuvo lugar a principios de 2002 en sólo cinco semanas. La superficie de hielo fragmentada y movilizada fue de 3.500 km^2 . Imágenes de T. Scambos, National Snow & Ice Data Center/NOAA, Universidad de Colorado.

tólogos debaten si estamos presenciando el principio de un proceso acelerado inducido por el uso de combustibles fósiles, o tan solo un ciclo climático natural. Algunos indicios apuntan a que las plataformas de hielo que se están desintegrando son muy recientes. Si esto se confirma, podríamos estar presenciando oscilaciones climáticas naturales (el hielo se acumula y se funde con facilidad); sin embargo, otros datos apoyan la idea de que parte del hielo ahora destruido se había formado hace al menos 11.000 años. Esto indicaría que el hielo es muy estable, y apoyaría las sospechas de que su acelerada fusión actual sería causada por el hombre. Sin embargo, los glaciares avanzaron en las décadas de 1930 y 1940, después de un siglo de Revolución Industrial, y no empezaron a retroceder en forma significativa hasta mitad de los sesentas; luego frenaron de 1985 a 1995, y ahora parecen desbocados. Evidentemente, se trata de una dinámica difícil de predecir.

Estas investigaciones no han hecho más que comenzar, pero es fácil comprender que está en juego algo importante. Como las plataformas de hielo flotan en el agua, su fusión no contribuye al aumento del nivel del mar (ya que están desalojando un volumen de agua igual al que proporcionarían). En cambio, la desaparición del hielo continental sí daría lugar a una catástrofe. En caso de que el hielo de la Península Antártica se fundiese, el nivel de los mares aumentaría 7 metros; pero la fusión de los 30 millones de kilómetros cúbicos de hielo que cubren todo el continente acarrearía una subida del nivel del mar de más de 60 metros, y la civilización actual tendría que evolucionar en alguna dirección hoy imprevisible.

BIBLIOGRAFÍA

- Anderson J.B. (1999). *Antarctic marine geology*. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido, 289 p.
- Anguita F., Renard P., Díaz C., Pérez L.A. y López M. (2005). *GeoAntártida. Geología de un itinerario por la Península Antártica y las Islas Shetland del Sur y de Palmer*. AEPECT.
- DeConto R.M. y Pollard D. (2003). Rapid Cenozoic glaciation of Antarctica induced by declining atmospheric CO₂. *Nature*, 421, 245-249.
- Lawver L.A. y Gahagan L.M. (2003). Evolution of Cenozoic seaways in the circum-Antarctic region. *Palaeogeogr., Palaeoclimat., Palaeoecol.*, 198, 11-37.
- Martini I.P., Brookfield M.E. y Sadura S. (2001). *Glacial geomorphology and geology*. Prentice Hall, New Jersey.
- Rabassa J. (1997). El hielo en el océano. *Historia Marítima Argentina*, Tomo I, Sección VII: Glaciología Antártica, 493-495, Buenos Aires.
- Rignot E. y Thomas R.H. (2002). Mass balance of polar ice sheets. *Science*, 297, 1502-1505.
- Siegert M.J., Ellis-Evans J.C., Tranter M., Mayer C., Petit J.R., Salamatink A. y Priscu J.C. (2001). Physical, chemical and biological processes in Lake Vostok and other Antarctic subglacial lakes. *Nature*, 414, 604-609.
- Studinger M., Bell R.E., Buck W.R., Karner G.D. y Blankenship D.D. (2004). Sub-ice geology inland of the Transantarctic Mountains in light of new aerogeophysical data. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 220, 391-408.
- Tingey R.J., Ed. (1991). *The Geology of Antarctica*. Oxford University Press, Nueva York, EE.UU.
- Van der Veen C.J. (2002). Calving glaciers. *Progr. Phys. Geogr.*, 26, 96-122. ■